

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УГЛЕРОДНЫХ МИКРОЧАСТИЦ ПЫЛИ МЕТЕОРИТА «ЧЕЛЯБИНСК»

Савостеенко Г.А.¹, Таскаев С.В.¹, Горькавый Н.Н.^{1,2}, Дудоров А.Е.¹, Аврамов П.В.³

¹Челябинский государственный университет, г. Челябинск, tsv@csu.ru

²SSAI/Goddard Space Flight Center/NASA, Greenbelt, USA

³Kyungpook National University, Daegu, South Korea

Метеорит «Челябинск», упавший 15 февраля 2013 года в районе Челябинска (Россия), был уникальным по своим масштабам явлением и вызвал огромный общественный и научный интерес. Падение метеорита сопровождалось взрывом, в результате основная масса перешла в пыль и была сосредоточена в газопылевом шлейфе [Горькавый, Дудоров, 2016]. В исследованных образцах обнаружены фрагменты углеродных структур, обладающие признаками кристаллической симметрии с осью шестого порядка.

Углеродные частицы в пыли находятся в разных конфигурациях, но с единым общим признаком – наличием огранки, которая аналогична огранке по базисным плоскостям кристаллов (см. рис. 1). Наи-

более интересна вытянутая частица, принципиально отличающаяся от сферических частиц. Отличие в форме должно быть обусловлено различными условиями роста или различными центрами кристаллизации. Предполагается, что в основе может выступать фуллерен и нанотрубка.

Для выяснения природы кристаллизации в такого рода структуру были проведены экспериментальные и теоретические исследования.

Энергодисперсионный микроанализ объекта на рис. 2 показывает, что он состоит в основном из углерода. Однако, наблюдаемая четко выраженная ось симметрии шестого порядка не характерна для кристаллической формы углерода в виде алмаза,

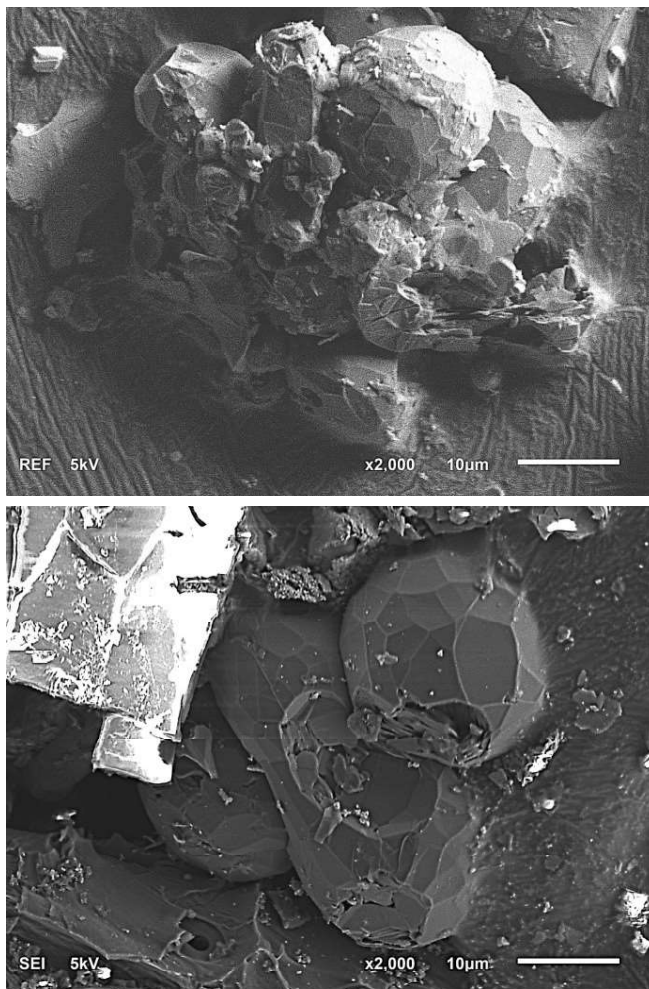


Рис. 1. Изображение углеродных частиц, полученные методом электронной микроскопии

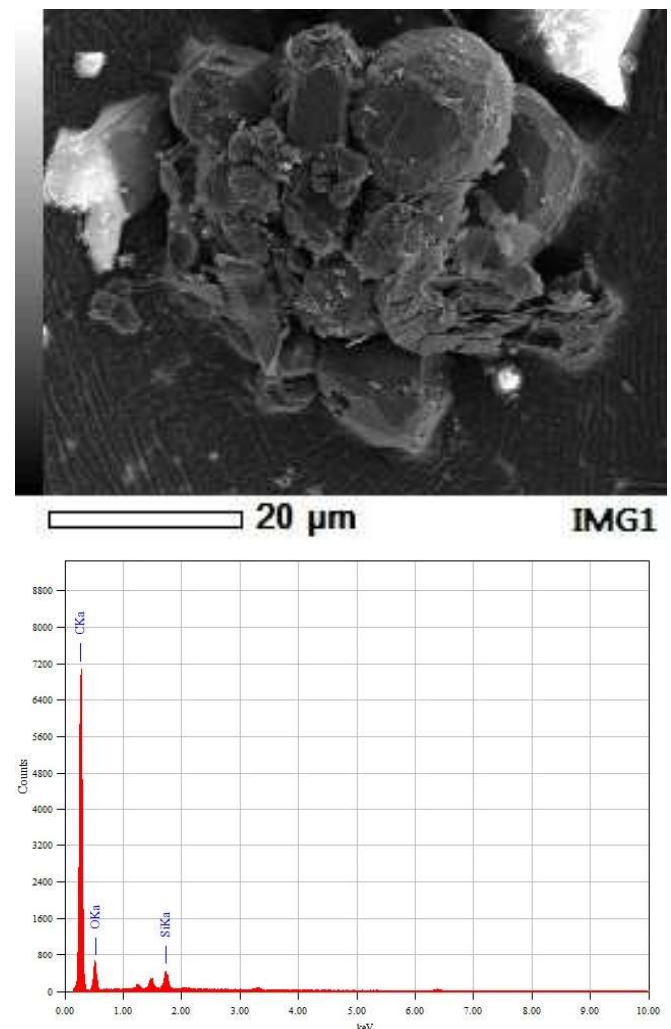


Рис. 2. Элементный состав углеродной частицы

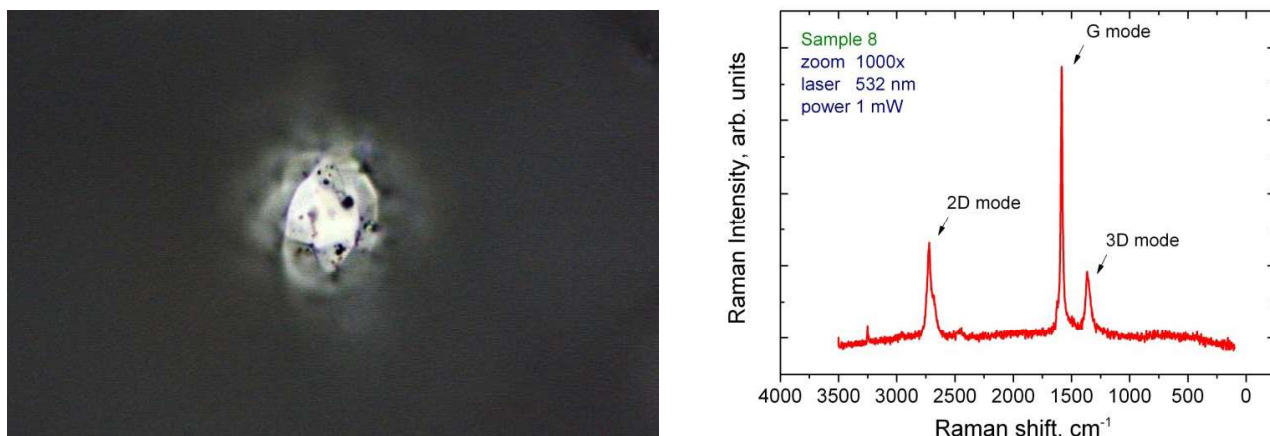


Рис. 3. Углеродная частица в пыли Челябинского метеорита: ОМ (слева); Раман-спектр (справа)

базисные плоскости которого представлены гранями тетраэдров.

Экспериментальные исследования с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света представлены на рис. 3. Наличие пика 3D mode на частоте $\sim 1330 \text{ cm}^{-1}$ в нашем случае может быть вызвано множественными дефектами структуры, гранями и, например, на спектрах, представленных на рис. 3 эта мода присутствует, однако говорить о том, что структура в этом случае может быть отнесена к смеси фаз, представленных sp-2 и sp-3 гибридизованными атомами углерода со 100 % уверенностью нельзя. Таким образом, на данном этапе, несмотря на наличие признаков кристаллической симметрии (в частности гексагональной), наличии пика, характерного для sp-3 гибридизованных атомов углерода на некоторых спектрах комбинационного рассеяния света, классифицировать объект как смешанное состояние графита и алмаза (гексагонального или кубического) нельзя.

Методом рентгеновской микродифракции обнаружены только рефлексы, соответствующие межплоскостному расстоянию $d \approx 3.35 \text{ \AA}$. Интенсивность

сигнала достаточно низкая (максимально 2000 событий для 700 сек экспозиции), можно предположить, что рефлексы являются наиболее сильными и формируются основной частью структуры частицы, а остальные можно отнести к фоновому шуму. Рефлексы с межплоскостным расстоянием $d \approx 3.35 \text{ \AA}$ могут принадлежать только одной аллотропной форме углерода – рефлексу (002) графита (рис. 4).

Тот факт, что обнаружено несколько рефлексов (002), относящихся к графиту, показывает, что изучаемая углеродная частица не является монокристаллом, а состоит из нескольких кристаллитов (является агломератом). Возможно предположить, что каждая грань изучаемой частицы является плоскостью (001) графита. Тем не менее, очевидно, что благодаря раздельному распределению рефлексов графита (002), частица не сформирована порошком и не является структурой типа «углеродного лука».

Теоретические исследования механизма формирования уникальных экзотических квазисферических и удлиненных гексагональных микрокристаллов графита проведены методами DFT (density functional theory) и MD (molecular dynamics) моделирования. Было обна-

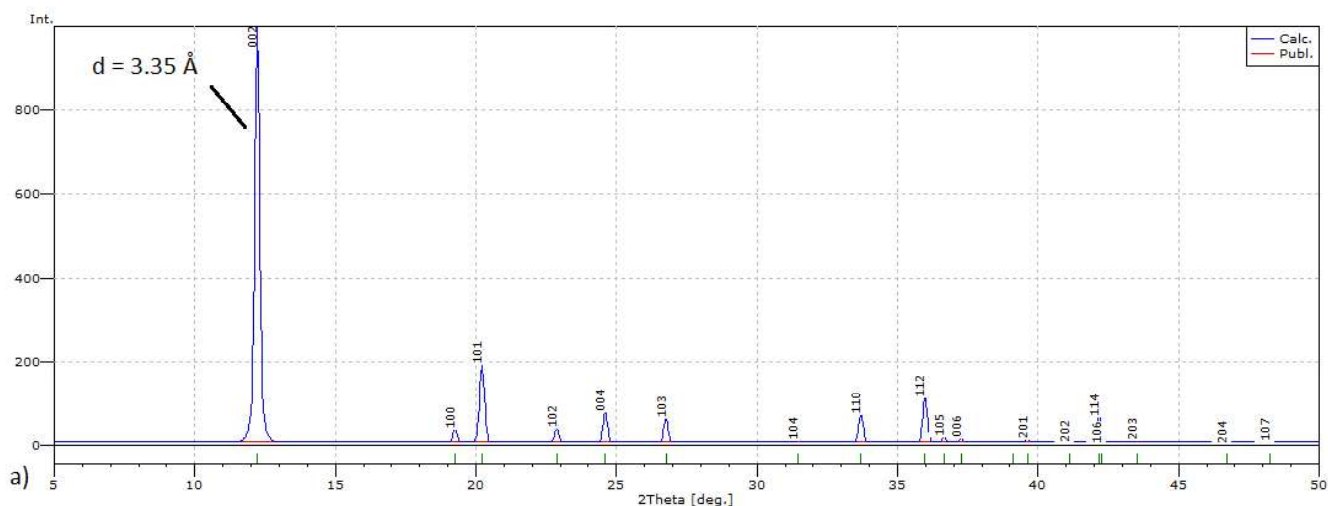


Рис. 4. Рентгеновская порошковая дифракция графита в случае Mo Kα излучения

ружено, что фуллерен C_{60} и полигексоциклооктадекан $-C_{18}H_{12}-$ могут быть кластерами, ответственными за образование микрокристаллов путем графитизации. Теоретические спектры комбинационного рассеяния простейших атомных моделей графитовых микрокристаллов с закрытой оболочкой непосредственно подтверждают предложенные механизмы.

Высокотемпературное образование многократно соединенных икосаэдрических алмазов класса II с фуллереновыми ядрами C_{60} и звездообразными гексагональными додекаэдрами (полигексаоциклооктадекан $(-C_{18}-)$) с последующей структурной эволюцией $sp^3 \rightarrow sp^2$ приводит к образованию икосаэдра с закрытыми оболочками и удлиненного графитового микрокристалла гексагональной симметрии с взаимной укладкой графитовых оболочек типа АВ графитового типа.

Уникальные структуры, обнаруженные в метеоритной пыли, которые ранее не наблюдались, еще

раз демонстрируют неограниченный потенциал природы для синтеза новых материалов. Чистый углерод, восстановленный из диоксида углерода в результате термической диссоциации, предположительно кристаллизуется на поверхности углеродистых наноструктур (фуллеренов и нанотрубок), образуя графитовые стопки, которые повторяют пространственную симметрию центра кристаллизации. Проведенные теоретические исследования показывают, что такая структура энергетически устойчива и может образовываться в условиях, наблюдаемых во время полета болида. Такие «кристаллы углерода» уникальны и ранее не наблюдались.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горькавый Н.Н., Дудоров А.Е. Челябинский суперболид. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2016. 223 с.